

基于模糊理论的船舶复合碰撞危险度计算

胥 文, 胡江强, 尹建川, 李 可
(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 基于船舶领域和动界的概念, 在船舶碰撞几何原理的基础上, 利用模糊规则和模糊综合评价方法, 本文提出一种船舶复合碰撞危险度的计算方法。确定最近会遇距离 (DCPA)、最近会遇时间 (TCPA)、两船距离、相对方位、船速比 5 个主要因素的隶属度函数, 并考虑航行区域状况、能见度情况和船舶的操纵性能等对船舶碰撞危险度的隶属度函数修正。用原始数据对 3 种不同会遇态势进行仿真和对 3 种不同碰撞危险度计算结果分析比较, 结果表明该方法的有效性。

关键词: 碰撞危险度; 模糊规则; 模糊综合评价; 隶属度函数

中图分类号: U442 文献标识码: A

文章编号: 1672-7649(2017)07-0078-07 doi: 10.3404/j.issn.1672-7649.2017.07.016

Composite evaluation of ship collision risk index based on fuzzy theory

XU Wen, HU Jiang-qiang, YIN Jian-chuan, LI Ke
(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: From the concepts of ship domain and arena, a composite evaluation of ship collision risk index is proposed by applying fuzzy theory and fuzzy comprehensive assessment based on the principles of geometry in ship collision in this paper. Membership function is determined by five main factors such as distance of closest point of approach (DCPA), time to the closest point of approach (TCPA), distance between ships, relative bearing and speed ratio in the consideration of correction to navigational surroundings, visibility and maneuverability etc. Three different encounter situations are simulated by using original data and three different results of collision risk index evaluation are compared with each other, the results prove the validity and efficiency of composite evaluation.

Key words: collision risk index; fuzzy theory; fuzzy comprehensive assessment; membership function

0 引 言

船舶安全航行需要自动化的导航仪器和设备, 尽管 GPS 定位精度变得越来越高, 国际海事组织 (IMO) 决议要求船舶强制配备自动识别系统 (AIS), 船舶防止碰撞的技术手段不断提高, 但船舶碰撞问题依然存在。使用这些设备, 船舶能够准确获取当前船位, 也很容易获取他船的船位、航向、船速等信息^[1]。但是由于地域结构、水中扰动、船舶的动态特性和影响海上交通的恶劣天气, 船舶在航道中航行时仍然存在碰撞问题。为了减少船舶碰撞事故的发生, 船舶碰撞危险度的计算是避碰问题的重点。

船舶避碰从评价碰撞危险开始, 并有几种不同的方法来定义船舶碰撞危险。藤井弥平提出的船舶领域

的概念和模型可用于评价碰撞危险。Goodwin^[2]研究了开阔水域的船舶领域模型, 并将开阔水域的船舶领域分为几个不同的扇形区, 但是此模型不包括模型尺度大小的具体数据。

船舶碰撞危险度计算是船舶航行系统中最重要的一环之一^[3-4]。分为以下 4 阶段: 第 1 阶段是利用船舶碰撞事故频率和碰撞概率的交通流理论来计算特定水域的船舶碰撞危险度; 第 2 阶段是船舶领域和基于船舶驾驶员的行为和心理考虑提出动界的概念 (为使船舶领域不受侵犯)。在参考文献[5-6]中, 专家学者使用不同的方法来计算船舶碰撞危险度; 第 3 阶段是研究人员考虑采用参考文献[4]中讨论的用最近会遇距离 (DCPA, Distance to Closet Point of Approach) 和最近

收稿日期: 2016-08-24

作者简介: 胥文(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能优化算法, 船舶运动控制。

会遇时间 (TCPA, Time to Closet Point of Approach) 来计算船舶碰撞危险度; 第 4 个阶段是综合考虑 DCPA 和 TCPA, 开始采用加权法来计算船舶碰撞危险度^[7-8]。DCPA 和 TCPA 是 2 个不同的变量, 研究人员需采用模糊理论来综合 DCPA 和 TCPA。如今, 大多数研究人员采用基于人工智能技术、模糊理论、专家系统和神经网络的方法来计算船舶碰撞危险度^[9-13]。为了计算船舶碰撞概率和避免船舶可能发生碰撞的情况, 本文提出利用模糊和模糊综合评价相结合的方法来计算船舶复合碰撞危险度。

基于船舶领域和动界的概念, 在船舶碰撞几何原理的基础上, 利用模糊理论通过 DCPA 和 TCPA 两者的综合考虑, 计算其船舶碰撞危险度 (C_1)。因为影响船舶碰撞危险度的因素很多, 通过最近会遇距离 (DCPA)、最近会遇时间 (TCPA)、两船距离、相对方位、船速比 5 个主要因素的隶属度函数, 考虑人、船、环境因素的误差修正, 计算船舶的碰撞危险度 C_2 。在模糊系统中再次利用 C_1 和 C_2 得到船舶的复合碰撞危险度 HCR。

1 船舶复合碰撞危险度计算方法

本文研究基于开阔水域的两船碰撞危险度计算, 通过碰撞几何原理分析可知, 影响船舶碰撞危险度大小的因素很多, 且互相制约, 判断船舶是否存在碰撞危险度的主要依据是基于船舶领域和动界的概念, 对 DCPA 和 TCPA 进行综合考虑。确定了最近会遇距离 (DCPA)、最近会遇时间 (TCPA)、两船距离、相对方位、船速比 5 个主要影响因素的隶属度函数, 并考虑航行区域状况、能见度情况和船舶的操纵性能等对船舶碰撞危险度的隶属度函数修正, 利用模糊规则和模糊综合评价方法进行船舶复合碰撞危险度的计算, 考虑了船舶微观和主观碰撞危险度因素。

1.1 DCPA 和 TCPA 的计算

图 1 表明了任意时刻船舶碰撞危险度计算流程, 通过该模型可计算船舶任意时刻的碰撞危险度大小。通过 VTS 雷达扫描到的船舶实时动态信息, 基于船位和航向计算船舶的 DCPA 和 TCPA。将 DCPA 和 TCPA 输入模糊逻辑系统并基于船舶航向、船舶间的距离、DCPA 和 TCPA 的隶属度函数计算碰撞危险度 C_1 和 C_2 。最后, 再次利用模糊理论计算船舶的复合碰撞危险度 HCR。

根据船舶碰撞几何模型对船舶运动状态参数进行分析。图 2 表述了两船运动状态, 分别为船 O (本

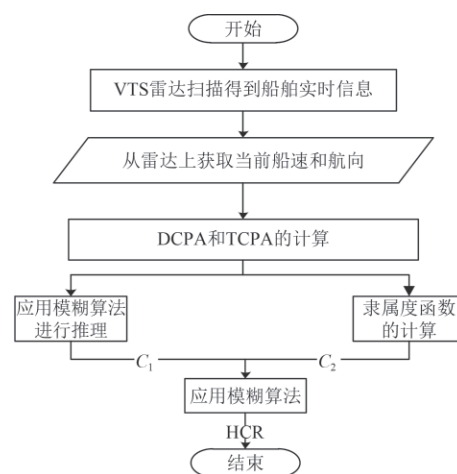


图 1 船舶复合碰撞危险度计算流程图

Fig. 1 The flow of composite evaluation of collision risk index

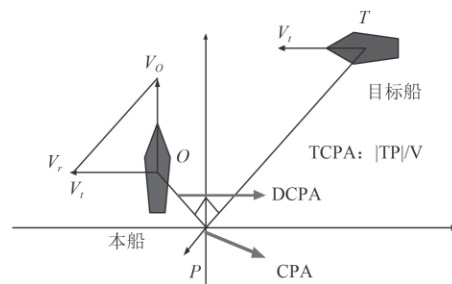


图 2 DCPA 和 TCPA 的计算

Fig. 2 The calculation of DCPA and TCPA

船) 和船 T (目标船)。两船都以不同的航速和航向运动。粗体黑色箭头表示船 O 和船 T 间的 DCPA, 以此来精确计算船舶间的碰撞危险度。

图 3 表明了船舶所有的会遇局面情况。当目标船向西北航行时, 本船向东北航行。两船都以不同的航速和航向航行。利用式 (1) 来计算本船相对于目标船的相对速度, 求得本船和目标船之间的 DCPA 和 TCPA。图 3 描绘了一条过本船位置作目标船位置平行线的垂直线交于 P 点。在目标船位置平行线和本船位置之间的距离就是 DCPA, 它的计算如式 (5) 所述。

目标船相对于本船的相对运动速度计算如下:

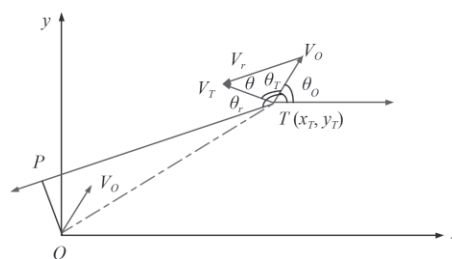


图 3 会遇局面图

Fig. 3 Encounter situation

$$V_r = \sqrt{V_O^2 + V_T^2 - 2|V_O \cdot V_T| \cos(\theta_T - \theta_O)}, \quad (1)$$

从数学角度分析, 在任意时刻船 O 和船 T 间的 DCPA 可通过下列方程计算得出:

$$d_{CPA} = |OP| = \frac{|y_T - x_T \tan \theta_r|}{\sqrt{\tan^2 \theta_r + 1}}, \quad (2)$$

从数学角度分析, 在任意时刻船 O 和船 T 间的 TCPA 可通过下列方程计算得出,

$$|TP| = \sqrt{|OT|^2 - |OP|^2} = \sqrt{(x_T^2 + y_T^2) - d^2}, \quad (3)$$

$$t_{CPA} = \frac{|TP|}{V_r} = \frac{\sqrt{(x_T^2 + y_T^2) - d_{CPA}^2}}{V_r}. \quad (4)$$

1.2 基于模糊规则的碰撞危险度计算

根据船舶海上避碰实践经验和国际海上安全避碰规则可知, 当 DCPA 小于 SDA (安全会遇距离) 和 TCPA 较小时, 船舶存在碰撞危险^[14]。船舶碰撞危险的影响因素有很多, 文献[15]中将影响因素归纳为: DCPA 和 TCPA, DCPA 和 TCPA 的误差、目标船方位和舷角、两船航速比等。但 DCPA 和 TCPA 两个因素反映了船舶间距离、方位和速度的变化, 可以表征其会遇态势, 本文采用 DCPA 和 TCPA 进行模糊推理。表 1 给出了变量 TCPA, DCPA 和 C_1 的 5 个语言值。对碰撞危险度进行定性分析, 并划分等级。用模糊语言变量“ S (小)”、“ MS (中小)”、“ M (中)”、“ MB (中大)”、“ B (大)”来表示 DCPA、DCPA。用模糊语言变量“ L (危险最小)”、“ ML (危险较小)”、“ M (危险中等)”、“ MH (危险较大)”、“ H (危险极大)”来表示碰撞危险度。

表 1 隶属度函数规则表
Tab. 1 Rules of membership function

DCPA/nm	语言值	TCPA/min	语言值	C_1	语言值
0~1	S	0~9	S	0~0.4	L
0.5~1.5	MS	6~12	MS	0.2~0.6	ML
1~2	M	9~15	M	0.4~0.8	M
1.5~2.5	MB	12~18	MB	0.6~1.0	MH
2~2.5	B	15~18	B	0.8~1.0	H

表 2 给出了 C_1 的模糊推理规则, 当 TCPA 和 DCPA 都是 S 时, C_1 则为 H 。

本文中用 2 个输入 1 个输出系统的语言值来表述推理规则。DCPA 和 TCPA 是过程状态变量, C_1 是控制变量, 确定了上述系统中 25 个 C_1 的规则。

1.3 基于模糊综合评价的碰撞危险度计算

基于模糊综合评价的碰撞危险度 C_2 的计算结果可

表 2 C_1 的隶属度函数规则表
Tab. 2 Rules of membership function of C_1

TCPA	DCPA				
	S	MS	M	MB	B
S	H	H	MH	MH	MH
MS	H	H	M	M	M
M	MH	M	M	ML	ML
MB	MH	M	ML	ML	L
B	MH	M	ML	L	L

以作为主观和客观评价, 通过减小其影响因素来得到最佳的计算结果。所以, 本文不采用 DCPA 和 TCPA 加权的方法计算碰撞危险度, 而是采用模糊综合评价的方法计算 C_2 。文献[16]中把 DCPA、TCPA、两船距离、相对方位、船速比 5 个因素作为基本评判参数, 并考虑航行区域状况、能见度情况和船舶的操纵性能等对船危险度的隶属度函数修正。为了更加符合海上避碰行动实际, 主要考虑以下 5 个影响因素: 任意时刻目标船和本船的距离、目标船的方位、船速比、DCPA 和 TCPA。所以, 目标影响因素的论域是:

$$u = \{d, \theta, K, t_{CPA}, d_{CPA}\}, \quad (5)$$

目标影响因素的模糊权重分配如下, 权重值根据文献[16], 取为: $w_d=0.14$, $w_\theta=0.10$, $w_k=0.08$, $w_{d_{CPA}}=0.36$, $w_{t_{CPA}}=0.32$ 。

$$\begin{cases} A = w_d, w_\theta, w_k, w_{d_{CPA}}, w_{t_{CPA}}, \\ w_d > 0, w_\theta > 0, w_k > 0, w_{d_{CPA}} > 0, w_{t_{CPA}} > 0, \\ w_d + w_\theta + w_k + w_{d_{CPA}} + w_{t_{CPA}} = 1. \end{cases} \quad (6)$$

目标评价矩阵如下, 其中 r_d , r_θ , $r_{d_{CPA}}$, $r_{t_{CPA}}$ 是目标危险隶属度。

$$B = \begin{bmatrix} r_d \\ r_\theta \\ r_{d_{CPA}} \\ r_{t_{CPA}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

由文献[17]可知, 船舶间距离越小, 船舶间碰撞危险度越大。任意时刻船舶间距离的隶属度函数如下:

$$u(d) = \begin{cases} 1 & d \leq d_1, \\ [(d_2 - d)/(d_2 - d_1)]^2 & d_1 < d \leq d_2, \\ 0 & d > d_2. \end{cases} \quad (8)$$

d_1 和 d_2 的大小取决于航行区域的状况、能见度以及人为因素的影响。动界是以驾驶员开始采取行动以避碰紧迫局面时与他船的距离为基础的超级领域。英国学者 Davis 等通过大量的调查统计得到了动界模型的具体数据, 在进行平滑其边界后, 得到了 1 个半径为 2.7 n mile 的圆的数学模型。令其区域半径为 R , 可以得到其表达式:

$$d_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot D_L, \quad (9)$$

$$d_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot R, \quad (10)$$

$$R = 1.7 \cos(\theta - 19^\circ) + \sqrt{4.4 + 2.89 \cos^2(\theta - 19^\circ)}. \quad (11)$$

式中: d_1 为船舶最晚避让距离; d_2 为船舶协调避让的距离; K_1 取决于能见度; K_2 取决于水域情况, K_3 取决于人为因素; D_L 为最晚施舵距离, 一般取 12 倍船长^[18]; R 为任意时刻船舶动界的半径。

不同方位的目标船对本船所构成的危险程度不同, 一般来说右舷大于左舷, 正横前大于正横后。

任意时刻目标船相对方位角的隶属度函数, 式中 θ 与本船与目标船的船速比 $K = \frac{v_o}{v_i}$ 有关:

$$u(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{1 + (\theta/\theta_0)^2}, & 0 \leq \theta < 180^\circ, \\ \frac{1}{(\frac{360^\circ - \theta}{\theta_0})^2}, & 180^\circ \leq \theta < 360^\circ, \end{cases} \quad (12)$$

$$\theta_0 = \begin{cases} 40^\circ, & K < 1, \\ 90^\circ, & K = 1, \\ 180^\circ, & K > 1. \end{cases} \quad (13)$$

如果其他参数相同, 船速比不同时, 其碰撞危险度也不相同。船速比越大, 船舶碰撞危险度越大, 令 $K \geq 0$, $W=2$, $0^\circ \leq C < 180^\circ$, 船速比的隶属度函数为:

$$u(K) = \frac{1}{1 + \frac{W}{K \sqrt{K^2 + 1 + 2K \sin C}}}, \quad (14)$$

DCPA 小于船舶安全会遇距离时, 船舶存在碰撞危险, 该值越小, 碰撞危险程度越大。任意时刻 DCPA 的隶属度函数为^[21]:

$$u(d_{CPA}) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{d_{CPA_0} - \lambda} \left(d_{CPA} - \frac{d_{CPA_0} + \lambda}{2} \right) \right], & \\ 0, & \end{cases} \quad (15)$$

适用于开阔水域的基于船舶领域的船舶安全会遇距离计算时, 需要考虑船舶领域存在的模糊边界 FBD^[19], 船舶领域进行平滑连续后大小和模糊边界值的计算如下^[20]:

$$domain = \begin{cases} 0.85 - \frac{\theta_t}{180^\circ} \times 0.2, \\ 1.8 - \frac{\theta_t}{180^\circ} \times 0.73, \\ 1.02 - \frac{360^\circ - \theta_t}{180^\circ} \times 0.57, \\ 0.85 - \frac{360^\circ - \theta_t}{180^\circ} \times 0.3, \end{cases} \quad (16)$$

$$FBD = 0.267 D_S. \quad (17)$$

1) 当能见度不良时, d_{CPA_0} 应该增大来扩大危险预报范围; 在复杂水域航行时, 航行水域受限, d_{CPA_0}

应该减小。这里取为:

$$d_{CPA_0} = \begin{cases} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot D_S - FBD, \\ K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot 1 - 0.276 D_S. \end{cases} \quad (18)$$

2) $\lambda = K_4 \cdot d_{CPA_0}$, 其中系数 K_4 由船舶状态的不稳定性、避碰不协调和设备的误差决定, 一般情况下 $K_4=2$, $\lambda=2d_{CPA_0}$ 。

TCPA 值大小与碰撞危险度的关系与 DCPA 类似, 任意时刻 TCPA 的隶属度函数为:

$$u(t_{CPA}) = \begin{cases} 1, & t_{CPA} < t_1, \\ \frac{t_2 - t_{CPA}}{t_2 - t_1}, & t_1 < t_{CPA} \leq t_2, \\ 0, & t_{CPA} > t_2, \end{cases} \quad (19)$$

$$t_1 = \frac{\sqrt{(d_1^2 - \lambda^2)}}{v_s}, \quad t_2 = \frac{\sqrt{(d_m^2 - d_{CPA_0}^2)}}{v_s}, \quad (20)$$

根据模糊综合评价方法得到目标危险度所有因素的综合评判结果:

$$C_2 = A \cdot B = \begin{bmatrix} w_d & w_\theta & w_k & w_{d_{CPA}} & w_{t_{CPA}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_d \\ r_\theta \\ r_k \\ r_{d_{CPA}} \\ r_{t_{CPA}} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

任意时刻的碰撞危险度 C_2 为:

$$C_2 = w_d u_d + w_\theta u_\theta + w_k u_k + w_{d_{CPA}} u_{d_{CPA}} + w_{t_{CPA}} u_{t_{CPA}}. \quad (22)$$

经过计算可以得到目标船的碰撞危险度大小。如果 $C_2=0$, 船舶间不存在碰撞危险; 如果 $C_2=1$, 船舶间一定存在最大碰撞危险; 如果 $C_2 \in [0, 1]$, C_2 越大, 船舶碰撞危险性越大。

2 合成碰撞危险度计算方法

利用 C_1 和 C_2 的合成得到的复合碰撞危险度 HCR 来优化结果, 该计算方法是基于图 1 中的碰撞危险度计算流程来展开。表 3 描述了该模糊函数规则, 更有利于通过 C_1 和 C_2 得到模糊函数来计算船舶复合碰撞危险度 HCR。

如表 3 所示, 本文为变量 HCR 设计 5 个语言值。通过输入 C_1 和 C_2 得到复合碰撞危险度 HCR。推理规则可以表述为 2 个输入一个输出的系统的语言规则。 C_1 和 C_2 是过程状态变量, HCR 是控制变量。

为了计算船舶的复合碰撞危险度, 在所提出的计算方法中构建了任意时刻的 C_1 、 C_2 和合成碰撞危险度的隶属度函数。图 4 和图 5 分别表述了 C_1 和 C_2 的隶属度函数。图 6 表述了合成碰撞危险度的隶属度函数。

表 3 隶属度函数规则

Tab. 3 Rules of membership function

C_1	语言值	C_2	语言值	HCR	语言值
0~0.4	<i>L</i>	0~0.4	<i>L</i>	0~0.4	<i>L</i>
0.2~0.6	<i>ML</i>	0.2~0.6	<i>ML</i>	0.2~0.6	<i>ML</i>
0.4~0.8	<i>M</i>	0.4~0.8	<i>M</i>	0.4~0.8	<i>M</i>
0.6~1.0	<i>MH</i>	0.6~1.0	<i>MH</i>	0.6~1.0	<i>MH</i>
0.8~1.0	<i>H</i>	0.8~1.0	<i>H</i>	0.8~1.0	<i>H</i>

表 4 复合碰撞危险度函数隶属度的推理规则

Tab. 4 Reasoning rules of composite collision risk

C_2	C_1				
	<i>L</i>	<i>ML</i>	<i>M</i>	<i>ML</i>	<i>H</i>
<i>L</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>ML</i>	<i>M</i>	<i>MH</i>
<i>ML</i>	<i>L</i>	<i>ML</i>	<i>ML</i>	<i>M</i>	<i>MH</i>
<i>M</i>	<i>ML</i>	<i>ML</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>MH</i>
<i>MH</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>ML</i>	<i>ML</i>	<i>H</i>
<i>H</i>	<i>MH</i>	<i>MH</i>	<i>MH</i>	<i>H</i>	<i>H</i>

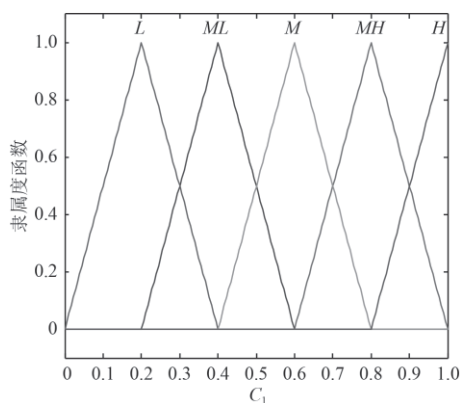
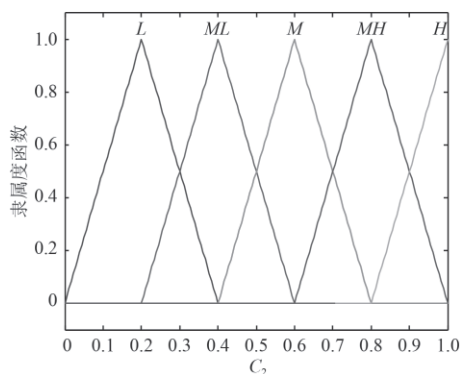
图 4 C_1 的隶属度函数图Fig. 4 The membership function of C_1 图 5 C_2 的隶属度函数图Fig. 5 The membership function of C_2

表 4 表明了 C_1 的隶属度函数。通过利用隶属度函数的 5 个语言值来定义 C_1 , C_1 在 0~1 之间。

图 5 表明了 C_2 的隶属度函数。通过利用隶属度函数的 5 个语言值来定义 C_2 , C_2 在 0~1 之间。图 6 表明

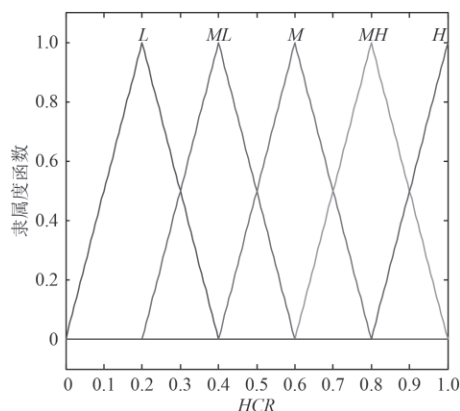


图 6 复合碰撞危险度的隶属度函数图

Fig. 6 The membership function of composite collision risk index

了 HCR 的隶属度函数。通过利用模糊推理表中的 C_1 和 C_2 来确定 HCR, HCR 的值在 0~1 之间。

图 7 为 C_1 和 C_2 作为控制变量, HCR 作为状态变量对应的三维曲面图。从图 7 可知, 当 C_1 和 C_2 逐渐增大时, HCR 基本上呈现相对增大状态, 基本符合船舶实际情况。在增大过程中, 存在一段减小的范围。本文认为, 造成这种结果主要是无法排除 C_1 计算中存在的“专家判断”和 C_2 中存在的人为因素等不具统计意义的数

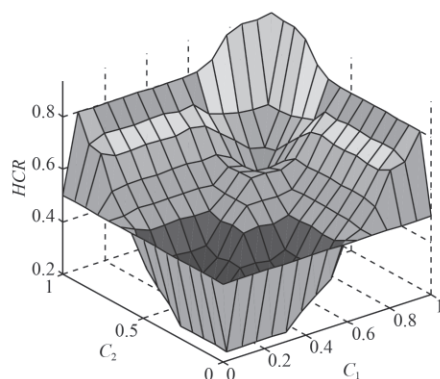


图 7 复合碰撞危险度输入/输出特性曲面图

Fig. 7 Input/output characteristic curve of composite collision risk index

3 仿真和结果分析

3.1 仿真结果的实现

在实际船舶航行中, 主要有 3 种会遇态势: 对遇、追越和交叉相遇。本文对对遇、追越和交叉相遇 3 种局面进行实验验证。已知本船为“育鲲”轮在开阔水域, 以航向 000°, 航速 15 kn 航行。本船长 116 m, 船舶满载排水量为 5 778.8 t, 此时海上能见度良好, 船舶操纵者驾驶状况良好 (取 $K_1=1$, $K_2=1$, $K_3=1$)。他船长 152 m, 船舶满载排水量为 9 879.6 t。

与他船在图 8~图 10 三种不同会遇态势下, 计算了模糊碰撞危险度和本文所提出复合碰撞危险度。

图 11~图 13 分别表明了图 8~图 10 中 3 种会遇态势下的复合碰撞危险度、基于模糊的碰撞危险度和基于模糊综合评价的碰撞危险度。通过利用本文所提出的方法来计算每种会遇态势下的碰撞危险度结果和显示比较分析。鉴于现有方法只是研究了两船的碰撞危险度, 本文进行了船舶密集区的仿真实验并计算了本船附近一定范围内的船舶碰撞危险度。为了更好地比较, 本文也计算了船舶的复合碰撞危险度。

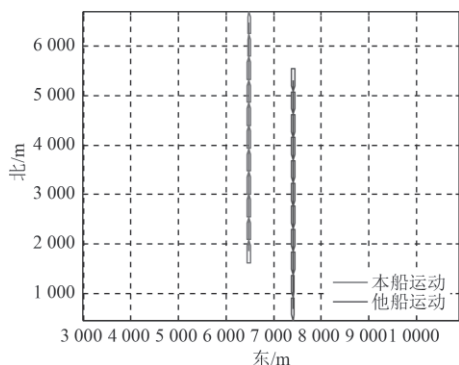


图 8 对遇局面仿真图

Fig. 8 Simulation of head-on situation

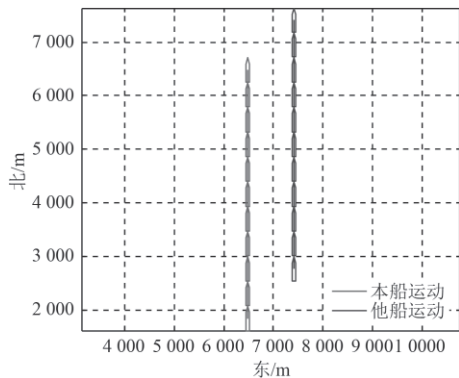


图 9 追越局面仿真图

Fig. 9 Simulation of overtaking situation

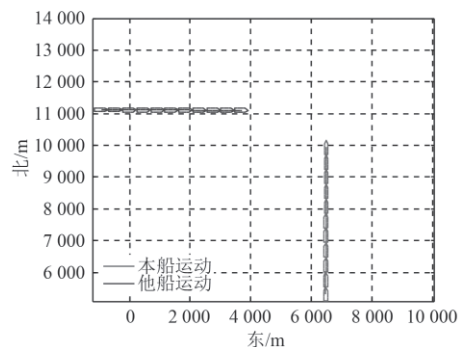


图 10 交叉相遇局面仿真图

Fig. 10 Simulation of crossing situation

3.2 仿真结果和性能分析

图 11 表明了在对遇局面下, 船舶合成碰撞危险度、基于模糊的碰撞危险度和基于模糊综合评价的碰撞危险度的变化。在该会遇态势中, 两船在一定距离内相互通过。当船舶开始相互对驶时, 两船距离足够长, DCPA 和 TCPA 也足够大, 这表明船舶间碰撞危险度很小。随着船舶相互接近时, 两船距离减小, 船舶碰撞危险度线性增加。当某一时刻两船相互接近并

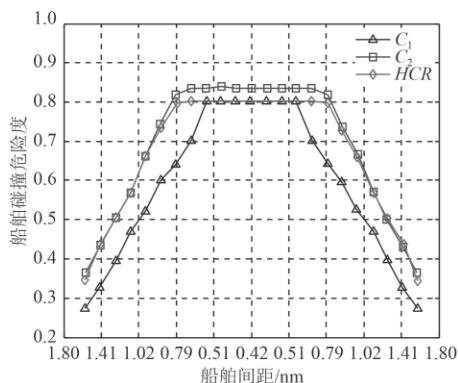


图 11 对遇局面下的碰撞危险度对比图

Fig. 11 Comparison of collision risk in head-on situation

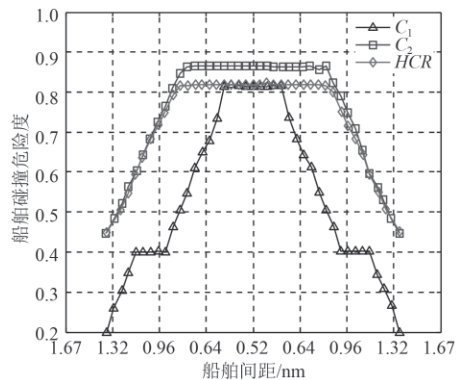


图 12 追越局面下的碰撞危险度对比图

Fig. 12 Comparison of collision risk in overtaking situation

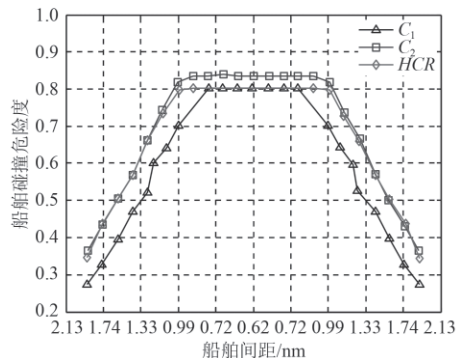


图 13 交叉相遇局面下的碰撞危险度对比图

Fig. 13 Comparison of collision risk in crossing situation

且距离为常量(保持不变)时,碰撞危险度在该时段是保持不变的。然而,当两船间距继续增大时,船舶碰撞危险度线性减小。结果表明复合碰撞危险度性能优于其他方法,因为复合碰撞危险度计算方法比其他计算方法在危险度计算中更有效。此外,复合碰撞危险度计算方法是通过预测下一个位置来计算危险度。实验结果表明 C_1 和 C_2 的比较对船舶碰撞危险度计算的输出有较大影响。

在追越局面下,当两船以不同航速航行时,验证了复合碰撞危险度的算法。图 9 显示了本船和目标船的路径。本文假定本船和目标船分别以 15 kn 和 12 kn 的船速航行,仿真结果如图 12 所示。图 12 表明了合成碰撞危险度、基于模糊的碰撞危险度和基于模糊综合评价的碰撞危险度的变化。当目标船从远距离追越本船到相互接近时,船舶碰撞危险度线性增加。在目标船接近本船的过程中,船舶碰撞危险度在一段时间内是保持不变的。然而,当追越局面过去时,船舶碰撞危险度线性减小。结果说明复合碰撞危险度计算方法比其他计算方法在危险度计算中更有效。

在交叉相遇局面下,当两船以相同航速,不同航向航行时,验证了复合碰撞危险度的算法。图 9 显示了本船和目标船的路径。假定本船和目标船分别以 15 kn 和 12 kn 的船速航行,仿真结果如图 12 所示。图 12 表明了合成碰撞危险度、基于模糊的碰撞危险度和基于模糊综合评价的碰撞危险度的变化。当目标船从远距离追越本船到相互接近时,船舶碰撞危险度线性增加。在目标船接近本船的过程中,船舶碰撞危险度在一段时间保持不变。然而,当交叉相遇局面过去时,船舶碰撞危险度线性减小。结果说明复合碰撞危险度计算方法比其他计算方法在危险度计算中更有效。

4 结 语

为了提高现有船舶碰撞危险度研究的准确性,本文提出了一种复合碰撞危险度的计算方法,该方法结合了模糊逻辑理论、模糊综合评价和传统的碰撞危险度计算方法。用原始数据进行 3 种不同的会遇态势仿真,并通过对 3 种不同会遇局面下的碰撞危险度结果分别进行比较分析,说明了复合碰撞危险度计算方法的可靠性和有效性。该算法易于实现并适用于包括复杂航行环境下的船舶避碰操纵。

参考文献:

- [1] AHNA Jin-Hyeong, RHEE Key-Pyo, YOU Young-jun. A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic [J]. *Applied Ocean Research*, 2012(37): 162-173.
- [2] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains [J]. *The Journal of Navigation*, 1975, 28(3): 328-344.
- [3] XU Q, MENG X, WANG N. Intelligent evaluation system of ship management [J]. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2010, 4(4): 479-482.
- [4] 史国友, 贾传炎. 航海模拟器中 DCPA TCPA 的算法[J]. *大连海事大学学报*, 1999(3): 17-20.
- [5] BUKHARI A C, TUSSEYEVA I, LEE Byung-gli, KIM Yong-Gi. An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS view point based on fuzzy inference system [J]. *Expert Systems with Applications*, 2013: 1220-1230.
- [6] HASEGAWA K, FUKUTO J. An intelligent ship handling simulator with automatic collision avoidance function of target ships [C]// *INSLC 17-International Navigation Simulator Lecturers' Conference*. Rostock, Germany, 2012: F23-1-10.
- [7] FENG Ming-kui, LI Yong-jin. Ship intelligent collision avoidance based on maritime police warships simulation system [C]// *IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EEESYM)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2012: 293-296.
- [8] KOIKE T, OKAZAKI T. Development of ship simulator system for designing auto-pilot [C]// *World Automation Congress (WAC)*. Kobe, Japan, 2010: 1-5.
- [9] SUI Jiang-hua. An AND-OR fuzzy neural network, ant colony optimization-methods and applications [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic*. Sanya, China, 2007: 1194-1199.
- [10] XUE Yan-zhuo, CLELLAND D. Automatic simulation of ship navigation [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17/18): 2290-2305.
- [11] 李丽娜, 杨神化, 曹宝根, 等. 船舶避碰智能决策自动化研究[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 188-192.
- [12] HASEGAWA K. Automatic collision avoidance system for ship using fuzzy control [C]// *Proc Eighth Ship Control Systems Symposium (SCSS)*. The Hague, Netherlands, 1987: 34-58.
- [13] FUKUTO J, HASEGAWA K, MIYAKE R, YAMAZAKI M. Ship handling simulator for assessing onboard advanced navigation support systems and services [C]// *Introduction of Intelligent Ship Handling Simulator, Proc MARSIM 2012*. Singapore, 2012: 159-166.
- [14] 吴兆麟. 船舶避碰与值班[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1998: 60-66.
- [15] 范少勇. 影响船舶碰撞危险度的因素[J]. *天津航海*, 2006(1): 1-2, 20.
- [16] 周江华, 吴春杰. 船舶碰撞危险度模型的构建[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2004(1): 61-65.
- [17] 郑中义, 吴兆麟. 船舶避碰决策[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2000.
- [18] 大连海运学院船艺教研室. 船艺[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- [19] 赵劲松, 王逢辰. 确定避碰时机的模型[J]. *大连海运学院学报*, 1989, 15(5): 1-6.
- [20] 李万垒. 开阔水域单船避碰智能决策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [21] 刘宇宏, 陈洪波, 郝燕玲. 一种基于模糊原理的碰撞危险度模型[J]. *中国航海*, 1998(2): 23-29.